

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МОРОЗОВ КОСТЯНТИН В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ**



УДК 004.05

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДІНКИ НЕБАЗОВИХ  
ВІДМОВСТІЙКИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи і компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, доцент

**Романкевич Віталій Олексійович,**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Дрозд Олександр Валентинович,**

Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем і мереж

кандидат технічних наук, доцент

**Дрововозов Володимир Іванович,**

Національний авіаційний університет, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

Захист відбудеться «\_\_» квітня 2021 р. о \_\_\_\_ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02 у КПІ імені Ігоря Сікорського (м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 516).

Відгуки на автореферат у двох екземплярах, завірені печаткою установи, просимо надсилати на адресу: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, вченому секретарю КПІ імені Ігоря Сікорського.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



М. М. Орлова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасному світі все більш поширеною стає тенденція до зменшення фізичної участі людини в різних галузях діяльності. З одного боку це дозволяє збільшити якість виконуваних процесів завдяки подоланню фізіологічних обмежень людини (швидкість реакції, обмежена концентрація уваги тощо), мінімізації впливу людського фактору (можливість помилок, вплив емоційного та фізіологічного стану і т.д.), а з іншого – звільнити оператора від виконання монотонних та низькоінтелектуальних завдань. Окрім того, деякі досить складні задачі на даному етапі науково-технічного прогресу принципово не можуть виконуватися за безпосередньої участі людини (наприклад, далекі космічні місії). В таких об'єктах задачі керування частково чи повністю покладаються на так звану систему керування (СК), що виконує обробку сигналів з датчиків, формуючи керуючі сигнали. Зазвичай сучасні СК будуються на основі одного чи декількох мікропроцесорів.

В деяких випадках для системи висуваються підвищені вимоги по надійності. Це зокрема стосується так званих систем критичного застосування (СКЗ), вихід з ладу яких може призвести до значних матеріальних, фінансових або екологічних збитків, загрожувати життю та здоров'ю людей, безпеці країни і т.п. (електростанції, заводи, транспорт, особливо авіаційний та залізничний, банківські системи, космічні апарати, військова техніка тощо). СК таких об'єктів також мають бути високонадійними, для чого можуть бути побудовані на основі так званих відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС), що за рахунок внесення того чи іншого типу надлишковості здатні зберігати свою роботоздатність навіть при відмові деякої множини своїх процесорів.

Розробникам необхідні інструменти для оцінки параметрів надійності створюваної ними ВБС. Зазначимо, що деякі СК складаються з десятків або навіть сотен процесорів, які можуть бути різних типів та мати різні характеристики. В результаті цього, задача розрахунку параметрів надійності складних ВБС керування іноді є досить складною. Існуючі методи розрахунку таких параметрів не завжди є досить оптимальними для використання на практиці.

Таким чином, дослідження в області розрахунку надійності ВБС є актуальними, зокрема і для України, яка є одним з провідних виробників авіаційної, космічної та військової техніки та активно розвиває свою промисловість.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконувалися на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-дослідницьких держбюджетних робіт:

- «Спеціалізована комп'ютерна система діагностування та розрахунку надійності реконфігурованих відмовостійких багатопроцесорних систем», № держреєстрації 0110U000262 (2010–2011 рр.).

- «Методи та засоби підвищення надійності та інформаційної стійкості багатопроцесорних систем для об'єктів критичного призначення», № держреєстрації 0113U000716 (2013–2014рр.);

- «Методи оцінки та забезпечення необхідного рівня технічної безпеки роботи спеціалізованих багатопроцесорних систем управління», № держреєстрації 0115U000323 (з 2015р.).

Матеріали також планується залучити до наукової теми, що наразі подана на конкурс в Міністерство освіти і науки України.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є зменшення часу виконання експерименту з GL-моделлю небазових відмовостійких багатопроцесорних систем шляхом її модифікації, а також оцінка повноти множини взаємоперевірок процесорів у системі з довільною топологією.

*Основні задачі дослідження* у відповідності до поставленої мети полягають в наступному.

1. Аналіз сучасних методів розрахунку показників надійності ВБС та методів моделювання поведінки ВБС в потоці відмов. Обґрунтування вибору методу розрахунку показників надійності ВБС шляхом виконання статистичних експериментів з GL-моделями.

2. Аналіз методів побудови GL-моделей небазових систем. Обґрунтування важливості розробки методів модифікації GL-моделей шляхом зміни їх реберних функцій.

3. Аналіз властивостей MBP-моделі (моделі з мінімальним числом втрачених ребер) як різновиду GL-моделей. Розробка методу модифікації MBP-моделі шляхом зміни однієї з її реберних функцій. Аналіз множини векторів стану системи, що блокуються, в залежності від виду модифікованої функції та інших параметрів модифікації.

4. Аналіз результатів модифікації у випадку зміни кількох реберних функцій MBP-моделі. Пошук критеріїв вибору пар реберних функцій MBP-моделі, сумісних для модифікації.

5. Розробка методу та алгоритму формалізації аналізу результатів взаємного тестування пар процесорів та отримання вектору стану системи згідно з моделлю Препарати-Метса-Чена. Оцінка ефективності методу для заданої множини тестових перевірок.

6. Розробка методів побудови GL-моделей систем, компоненти яких мають різну вагу, а також систем, які, як і їх компоненти, мають більш ніж два стани роботоздатності.

7. Аналіз особливостей побудови моделей ієрархічних систем. Розробка алгоритму побудови GL-моделей систем із ковзним резервом.

*Об'єктом дослідження* є процеси розрахунку показників надійності складних відмовостійких багатопроекторних систем та їх діагностування.

*Предметом дослідження* є методи і засоби формування графо-логічних моделей поведінки відмовостійких багатопроекторних систем в потоці відмов і виконання з ними статистичних експериментів, а також методи отримання вектору стану таких систем шляхом проведення їх самотестування.

*Методи дослідження.* При виконанні досліджень дисертаційної роботи використовувалися методи теорії графів, булевої алгебри, теорії множин та комбінаторного аналізу. При розробці моделей систем, які, як і їх компоненти, мають більш ніж два стани роботоздатності, були також використані методи багатозначної логіки.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається наступними положеннями.

1. Вперше запропоновано метод перетворення базової GL-моделі за рахунок модифікації реберних функцій МВР-моделі, який призводить до блокування певної множини векторів стану системи, що відрізняють модель від базової, з метою забезпечення її адекватності. На базі аналізу цієї множини виявлена можлива необхідність модифікації декількох функцій МВР-моделі, показана можливість появи побічних ефектів, визначено умови їх появи та характеристики. Вперше сформульовано критерії вибору реберних функцій, що можуть бути модифіковані без виникнення побічних ефектів для випадку модифікації двох реберних функцій моделі.

2. Вперше запропоновано аналітичний апарат, що базується на результатах заданої множини взаємних перевірок процесорів ВБС і який дозволяє за рахунок формування та перетворення булевого рівняння спеціального виду визначити якість заданої множини взаємоперірок: чи вона здатна виявити стани процесорів системи.

3. Вперше запропоновано метод побудови GL-моделей, який за рахунок  $n_i$ -кратного дублювання відповідних елементів вектору стану системи, вибираючи величини  $n_i$  пропорційними вагам відповідних компонентів системи, дозволяє будувати моделі так званих зважених систем (компоненти їх мають різну вагу), які в загальному випадку є небазовими.

4. Вперше запропоновано узагальнення методу побудови GL-моделі за рахунок використання функцій багатозначної логіки в якості реберних функцій. Дане узагальнення дозволяє будувати моделі систем, які, як і їх компоненти, мають більш ніж два стани роботоздатності.

5. Вперше запропоновані методи побудови GL-моделей, які за рахунок комбінування МВР-моделей, а для деяких випадків також використання так званих двоїстих моделей, вперше запропонованих в роботі, дозволяють побудову моделей ієрархічних систем, що складаються з декількох підсистем та в загальному випадку не є базовими.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається тим, що в ході дисертаційної роботи запропоновано і досліджено ряд методів модифікації МВР-моделей, що дозволяють моделювати поведінку небазових ВБС в потоці відмов. Однією з переваг запропонованих підходів є те, що їх застосування не призводить до зміни структури графа моделі, в результаті чого процедура визначення зв'язності графа є тривіальною і не потребує значних обчислювальних можливостей. Запропонований аналітичний апарат для аналізу результатів взаємного тестування пар процесорів ВБС дозволяє на основі проведених тестів отримувати вектор стану системи довільної структури, а також може бути основою для розробки оптимальних або квазіоптимальних (за кількістю необхідних тестів) стратегій вибору наступних тестів в залежності від результатів попередніх.

Отримані результати можуть бути застосовані в організаціях, що займаються проектуванням, експлуатацією та оцінкою показників надійності реконфігурованих відмовостійких багатопроекторних систем керування складними об'єктами, що, зокрема підтверджується довідкою від ІТТФ НАН України.

У навчальному процесі вищої школи результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем КПП ім. Ігоря Сікорського в курсі лекцій «Тестування, надійність, контроль та діагностика комп'ютерних систем», що підтверджується відповідним актом.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, наведені в основній частині дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно.

В [9] здобувачем доведено твердження про кількість функцій, що приймають нульове значення для другого та третього з розглянутих випадків. В [8] автором запропоновано метод оцінки кількості можливих розподілів функцій по процесорах. В [7] здобувачем розроблено алгоритм побудови моделі системи. В [6] дисертанту належить ідея використання підмножин додаткових векторів для уникнення недоліку в запропонованому алгоритму пошуку множини векторів стану системи. В [5], [16] автором запропоновано спосіб модифікації реберної функції GL моделі, сформульовано та доведено твердження щодо множини векторів, блокованих в результаті такої модифікації. В [4] дисертантом сформульовано критерії вибору пар функцій, що можуть бути сумісно модифіковані без появи побічного ефекту (блокування векторів із підвищеною кратністю відмов). В [3], [15] автором дисертації виконано аналіз границь зміни поведінки моделі в залежності від кількості модифікованих реберних функцій. В [2], [14] дисертантом запропоновано метод побудови GL моделей розглянутих ієрархічних систем, а в [1], [11] – використання проміжних допоміжних моделей для поєднання моделей, що відповідають підсистемам нижнього та поточного рівня ієрархії. В [21] здобувачем запропоновано метод оптимізованого розрахунку виразів реберних функцій для базових GL моделей. В [20] дисертантом

розроблено методику оцінки похибки для запропонованого в роботі методу розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ієрархічних ВБС, підсистеми яких можуть мати спільні процесори. В [19] здобувачу належить ідея побудови системи із ковзним резервом на основі комбінації кількох базових моделей. В [17], [18] дисертантом запропоновано алгоритм побудови спрощених базових з відмовостійких GL моделей, що базується на зсуві змінних. В [13] автором запропоновано метод побудови моделі системи із заданими цілими або дробовими вагами (кожного з її компонентів). В [12] дисертантом запропоновано формальний метод визначення стану процесорів системи за результатами проведених тестових випробувань. В [10] автору дисертації належить ідея використання функцій багатозначної логіки в якості реберних функцій GL моделей, а також спосіб визначення стану системи відповідно до таких моделей. В [22], [23] здобувачем розроблені алгоритми побудови моделей ВБС відповідно до їх параметрів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на 14 науково-технічних конференціях, з них 10 – міжнародних:

- Науково-технічних семінарах кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ (2010 – 2020 рр.)
- 17-й ÷ 19-й Международной научно-практической конференции SAIT, УНК «ИПСА» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (2015 - 2017 рр.);
- 23-й, 25-й та 26-й Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті», м. Алушта (2010, 2012, 2013 рр.);
- 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації», м. Вінниця, травень 2011р.;
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Комп'ютерні системи і проектування технологічних процесів та обладнання», м. Чернівці (17-19 лютого 2016 р.);
- II всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ, 2015 р.;
- Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», м. Вінниця, ВНТУ (2010 рр.);
- Прикладна математика та комп'ютинг, м. Київ (2012, 2015 рр.);
- 6-й ÷ 7-й міжнародних науково-практичних конференціях «Гарантоздатні (надійні та безпечні) системи, сервіси та технології» (2012 – Севастополь, 2014 – Київ).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 23 наукових працях, серед яких 9 статей у наукових фахових виданнях (в тому числі 3 статті у закордонних наукових періодичних виданнях, 2 з яких входять до

наукометричної бази «Web of Science», та 6 статей у наукових фахових виданнях України, 4 з яких включені до наукометричних баз даних), 12 публікацій в збірниках тез доповідей науково-технічних конференцій (8 з яких – міжнародні); 2 свідцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг роботи становить 248 сторінок друкованого тексту (серед яких основна частина – 154 сторінки, додатки – 54 сторінки), 16 рисунків, 12 таблиць, 13 додатків та списку використаної літератури на 128 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та задачі дослідження. Також охарактеризовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** дисертації розглянуті загальновідомі підходи до розрахунку показників надійності відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС), серед яких можна виділити дві основні групи.

1. Методи, що дозволяють будувати аналітичні вирази для безпосереднього розрахунку показників надійності ВБС.
2. Методи, що базуються на проведенні статистичних експериментів з моделями поведінки ВБС в потоці відмов.

Методи з першої групи є цікавими тим, що дозволяють отримувати аналітичні вирази для безпосереднього розрахунку показників надійності системи на базі значень показників надійності її компонентів, в результаті чого цей процес має помірну розрахункову складність, а результати розрахунків можуть бути отримані із довільним значенням точності. Зокрема, в розділі розглянуто ряд аналітичних методів розрахунку показників надійності для так званих базових або  $k$ - $z$ - $n$  систем.

Можна виділити два основних типи таких систем:  $k$ - $z$ - $n$ : $G$  та  $k$ - $z$ - $n$ : $F$ . Система  $k$ - $z$ - $n$ : $G$  складається з  $n$  компонентів і залишається роботоздатною, якщо роботоздатними є щонайменше  $k$  з них. Система  $k$ - $z$ - $n$ : $F$  виходить з ладу, якщо хоча б  $k$  з  $n$  її компонентів виходить з ладу. Очевидно, що система  $k$ - $z$ - $n$ : $G$  є одночасно і системою  $(n - k + 1)$ - $z$ - $n$ : $F$ , і навпаки, система  $k$ - $z$ - $n$ : $F$  є одночасно і системою  $(n - k + 1)$ - $z$ - $n$ : $G$ .

За іншою термінологією  $n$ -процесорна ВБС, що залишається роботоздатною рівно доти, доки відмовило не більше ніж  $t$  будь-яких її процесорів називається базовою та позначається  $K(m, n)$ . Відзначимо, що це в свою чергу відповідає визначенню системи  $(m + 1)$ - $z$ - $n$ : $F$ . Всі інші системи вважаються небазовими.



Зокрема, ймовірність безвідмовної роботи  $k$ -з- $n$ : $G$  системи з однаковими незалежними компонентами може бути розрахована за формулою

$$R(k, n) = \sum_{i=k}^n C_n^i p^i q^{n-i},$$

де  $p$  – ймовірність безвідмовної роботи кожного з компонентів системи, а  $q = 1 - p$  – ймовірність його відмови. Якщо ж ймовірності безвідмовної роботи компонентів ВБС не є однаковими, то складність розрахунків значно збільшується. Зокрема, для вирішення цієї задачі можуть бути використані підходи на основі методів включення-виключення та їх покращені варіанти, проте вони за своєю суттю є алгоритмами перебору та мають досить високу розрахункову складність. Так, відповідно до одного з таких методів ймовірність безвідмовної роботи системи може бути розрахована відповідно до формули

$$R(k, n) = \sum_{i=k}^n (-1)^{i-k} C_{i-1}^{k-1} \sum_{j_1 < j_2 < \dots < j_i} \prod_{l=1}^i p_{j_l},$$

де  $p_i$  – ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го компонента системи.

Відомі також і більш ефективні методи вирішення даної задачі. Зокрема, підхід Барлоу-Хідтмана на базі породжуючої функції потребує  $(n-k)(1,5n + 1,5k + 4) + 3k$  операцій, підхід Белфора на базі перетворення Фур'є вимагає  $15n \log n + 11n - 2$  операцій, підхід Рушді на базі симетричної булевої функції –  $3k(n-k+1)$  операцій, а метод вкладених марківських ланцюгів має складність порядку  $O(k(n-k+1))$ .

Окремо розглянуто також так звані зважені  $k$ -з- $n$  системи. В такій системі кожний компонент має деяку вагу  $w_i$ ,  $w_i > 0$ , де  $i$  – номер компонента. Загальна вага  $w$  дорівнює сумі ваг  $w_i$  всіх компонентів системи. Система  $k$ -з- $n$ : $G$  є роботоздатною, коли сумарна вага всіх її роботоздатних компонентів є не меншою, ніж деяке значення  $k$ , при цьому, в даному випадку воно може бути більшим, ніж  $n$ , оскільки одиниці розмірності є різними, проте,  $k \leq w$ . Зважена  $k$ -з- $n$ : $G$  система (якщо всі  $w_i$  – цілі) є еквівалентною зваженим  $(w-k+1)$ -з- $n$ : $F$  системі, яка виходить з ладу, якщо загальна вага несправних компонентів стає не меншою, ніж  $(w-k+1)$ . Таким чином, звичайна  $k$ -з- $n$ : $G$  система є частковим випадком зваженої  $k$ -з- $n$ : $G$  системи, у якої вага кожного з компонентів має значення 1. Варто зазначити, що значення  $w_i$  в загальному випадку може бути й не цілим числом.

На жаль, велика кількість реальних систем не є базовими. Зокрема це стосується систем керування складними об'єктами, які можуть включати процесори різних типів із різними характеристиками та наборами операцій, в результаті чого роботоздатність системи визначається не тільки кратністю несправностей, а й тим, які саме процесори вийшли з ладу. Для таких систем аналітичні методи розрахунку параметрів надійності не завжди є ефективними, зокрема через занадто високу складність як безпосередньо відповідних виразів, так і процесу їх побудови. Для оцінки параметрів надійності таких ВБС можуть бути застосовані методи з другої групи.

Методи, що базуються на проведенні статистичних експериментів, дозволяють отримати параметри надійності ВБС із деякою точністю, яка в

загальному випадку залежить від кількості проведених експериментів. Згідно з даними підходом, при кожному експерименті випадково згенерований вектор стану системи (вектор, кожний елемент якого відповідає стану окремого компоненту системи в потоці відмов) подається на відповідну модель, котра дозволяє визначити стан ВБС в потоці відмов залежно від його значення. Оцінка параметрів надійності ВБС формується на базі результатів проведених експериментів із врахуванням ймовірностей виникнення відповідних векторів стану. Відомими є методи, що дозволяють дещо підвищити точність оцінки при збереженні кількості експериментів в порівнянні з тривіальним підходом. Проте, зменшення розрахункової складності моделей з метою з одного боку підвищення точності оцінки за рахунок збільшення кількості проведених експериментів, а з іншого – зменшення часу та вартості отримання такої оцінки є актуальною задачею.

В якості моделі поведінки ВБС в потоці відмов запропоновано використовувати GL-моделі, які поєднують в собі властивості графів та булевих функцій. GL-модель являє собою неорієнтований граф, кожному ребру якого відповідає деяка булева реберна функція, що залежить від всіх або деяких елементів вектору стану системи. Якщо реберна функція приймає нульове значення, відповідне ребро виключається з графу. Зв'язність графу моделі відповідає стану системи: втрата зв'язності графом відповідає втраті роботоздатності системою.

Відомими є декілька алгоритмів побудови GL-моделей, які дозволяють будувати моделі, що мають свої переваги та недоліки. Зокрема, так звані МВР-моделі базуються на циклічних графах. Внаслідок цього процес визначення їх зв'язності є тривіальним. Окрім того, вони мають ряд інших важливих властивостей, зокрема, втрачають мінімальну кількість ребер на векторах з  $m + 1$  нулем. Цей тип GL-моделей було обрано за основу для подальших досліджень в даній роботі. Приклад МВР-моделі базової системи  $K(2, 9)$  представлено на рис. 1.

Варто відзначити, що алгоритми побудови GL-моделей дозволяють будувати моделі саме для базових систем. Такі моделі також називаються базовими. Для отримання ж небазових моделей відповідна базова модель має бути модифікована. Модифікація моделі може бути виконана одним з наступних способів:

- 1) шляхом зміни структури графа моделі (проведення додаткових ребер);
- 2) шляхом зміни виразів реберних функцій моделі;
- 3) шляхом комбінації перших двох методів.

Підходи, пов'язані із модифікацією графа моделі, є вже досить добре вивченими, на відміну від підходів, що базуються на основі зміни виразів реберних функцій. Дослідженню останніх і присвячені два розділи даної роботи. Третя група підходів наразі є найменш дослідженою та в перспективі має поєднати в собі переваги підходів з перших двох груп.

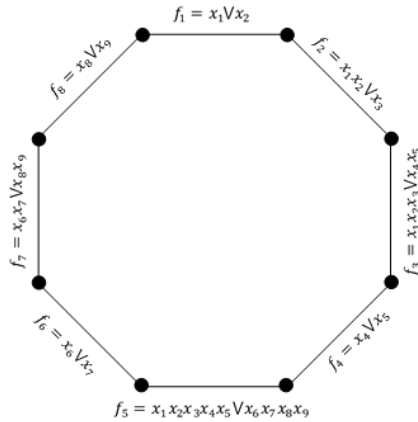


Рис. 1 – MBP-модель базової системи  $K(2, 9)$

В **другому розділі** запропоновано метод модифікації MBP-моделей шляхом зміни рівно однієї реберної функції та досліджено його властивості.

В розділі проаналізовано зміну поведінки MBP-моделі у випадку довільної зміни будь-якої з її реберних функцій. Очевидно, що в результаті модифікації будь-яка модель, на відміну від вихідної, почне на деякій множині вхідних векторів показувати роботоздатний стан системи (запропоновано вважати, що модель є *посиленою* на цих векторах, а відповідну модифікацію називати *посиленням* моделі), а на деякій іншій множині – нероботоздатний стан системи (відповідно, модель є *послабленою* на цих векторах, а модифікація є *послабленням* моделі). В залежності від виконаної модифікації одна з множин може бути порожньою. Доведено, що в результаті зміни будь-якої з реберних функцій MBP моделі  $K(m, n)$  вона може бути посилена лише на деяких векторах з  $m + 1$  нулем та/або послаблена на деяких векторах з  $m$  нулями.

Аналізуючи метод побудови MBP-моделей можна помітити, що вираз будь-якої реберної функції такої моделі складається з двох частин, об'єднаних між собою диз'юнкцією. Кожна частина, в свою чергу, є кон'юнкцією виразів всіх реберних функцій деякої допоміжної моделі, побудованої для частини вхідного вектора моделі, що будується. Модифікація функцій може базуватися як на зміні однієї з цих частин, так і на зміні їх обох одночасно. Є безліч способів модифікації таких частин, зокрема, шляхом зміни параметрів допоміжної моделі.

В загальному випадку реберна функція MBP моделі  $K(m, n)$  має вигляд

$$f_p = \kappa_1(i, n_1) \vee \kappa_2(m - i, n_2),$$

де  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$  – вирази, що відповідають кон'юнкціям реберних функцій допоміжних моделей  $K_1(i, n_1)$  та  $K_2(m - i, n_2)$ . Показано, що вираз  $\kappa_1$ , який залежить від значень  $n_1$  компонентів вхідного вектора (підвекторі) приймає нульове значення тоді і тільки тоді, коли не менш ніж  $i$  з них мають значення нуль. Аналогічно, вираз  $\kappa_2$ ,

що залежить від значень  $n_2$  інших компонентів вхідного вектора приймає нульове значення тоді і тільки тоді, коли нулю дорівнюють не менш ніж  $m - i$  з них.

З метою модифікації моделі пропонується змінити одну з частин даної реберної функції, наприклад,  $\kappa_1$  так, що вона не прийматиме нульове значення також і на деякій множині  $B$  підвекторів із  $i$  нулями. Доведено, що в результаті такої модифікації модель буде посилена на всіх таких векторах, у яких  $v_1$  належить множині  $B$ , а  $v_2$  і  $v_3$  містять відповідно  $m - i$  та 1 або  $m - i + 1$  та 0 нульових значень, де  $v_1$  та  $v_2$  – частини вхідного вектора, від яких відповідно залежать вирази  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$ , а  $v_3$  – частина, від якої жодний з цих виразів не залежить. Кількість таких векторів:  $N = |B| \cdot (C_{n_2}^{m-i} \cdot n_3 + C_{n_2}^{m-i+1})$ .

Модифікація може також виконуватися і в разі, якщо модель  $K(m, n)$  є допоміжною при побудові іншої МВР-моделі. В результаті множина векторів з  $m$  нулями, на яких значення кон'юнкції виразів реберних функцій цієї моделі не прийматиме нульового значення складатиметься з всіх таких векторів, у яких  $v_1$  належить множині  $B$ , а  $v_2$  і  $v_3$  містять відповідно  $m - i$  та 0 нульових значень. Кількість таких векторів:  $N = |B| \cdot C_{n_2}^{m-i}$ . Результат модифікації кінцевої моделі, в свою чергу, може бути оцінений аналогічним чином.

Одним із можливих варіантів модифікації виразу  $\kappa_1(i, n_1)$  є його заміна на вираз  $\kappa_1(i + 1, n_1)$ , тобто, кон'юнкцію виразів реберних функцій допоміжної моделі  $K_1(i + 1, n_1)$ , що відрізняється від вихідної на одиницю більшим значенням ступені відмовостійкості. В такому випадку множина  $B$  міститиме всі можливі вектори довжини  $n_1$  із  $i$  нулями. Кількість таких векторів:  $|B| = C_{n_1}^i$ .

З іншого боку, вираз  $\kappa_1$  може бути модифікований так, що почне приймати нульове значення на деякій множині  $B$  підвекторів із  $i - 1$  нулями. Доведено, що в результаті такої модифікації модель буде послаблена на всіх таких векторах, у яких  $v_1$  належить множині  $B$ , а  $v_2$  і  $v_3$  містять відповідно  $m - i$  та 1 або  $m - i + 1$  та 0 нульових значень, а кількість цих векторів:  $N = |B| \cdot (C_{n_2}^{m-i} \cdot n_3 + C_{n_2}^{m-i+1})$ . В разі ж використання моделі в якості допоміжної, множина векторів з  $m - 1$  нулями, на яких значення кон'юнкції виразів її реберних функцій прийматиме нульове значення складається з всіх таких векторів, у яких  $v_1$  належить множині  $B$ , а  $v_2$  і  $v_3$  містять відповідно  $m - i$  та 0 нульових значень, а кількість цих векторів:  $N = |B| \cdot C_{n_2}^{m-i}$ . Одним із можливих варіантів модифікації виразу  $\kappa_1(i, n_1)$  є його заміна на вираз  $\kappa_1(i - 1, n_1)$ , тобто, кон'юнкцію виразів реберних функцій допоміжної моделі  $K_1(i - 1, n_1)$ , що відрізняється від вихідної на одиницю меншим значенням ступені відмовостійкості. В такому випадку множина  $B$  міститиме всі можливі вектори довжини  $n_1$  із  $i - 1$  нулями. Кількість таких векторів:  $|B| = C_{n_1}^{i-1}$ . На рис. 2 наведено приклад моделі небазової системи, отриманої в результаті модифікації функції  $f_3$  базової моделі  $K(2, 9)$  запропонованим способом.

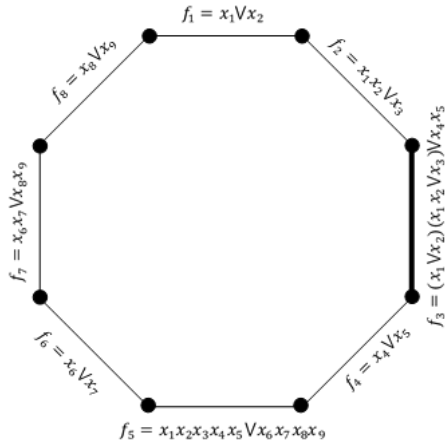


Рис. 2 – GL-модель небазової системи, отримана в результаті модифікації функції  $f_3$  базової моделі

В загальному ж випадку модифіковані можуть бути обидва вирази:  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$ . Причому, якщо вираз  $\kappa_1$  не приймає нульове значення на деякій множині  $B_1^1$  підвекторів із  $i$  нулями, та приймає нульове значення на деякій множині  $B_1^0$  підвекторів із  $i - 1$  нулями, а вираз  $\kappa_2$  не приймає нульове значення на деякій множині  $B_2^1$  підвекторів із  $m - i$  нулями, але приймає нульове значення на деякій множині  $B_2^0$  підвекторів із  $m - i - 1$  нулями, то модель буде посилена на всіх векторах, які відповідають хоч одній з наступних умов:

1.  $v_1$  належить множині  $B_1^1$ , а  $v_2$  і  $v_3$  містять відповідно  $m - i$  та 1 нулів;
2.  $v_1$  належить множині  $B_1^1$ ,  $v_2$  містить  $m - i + 1$  нулів, а  $v_3$  не містить нульових значень;
3.  $v_2$  належить множині  $B_2^1$ , а  $v_1$  і  $v_3$  містять відповідно  $i$  та 1 нулів;
4.  $v_2$  належить множині  $B_2^1$ ,  $v_1$  містить  $i + 1$  нулів, а  $v_3$  не містить нульових значень;

та послаблена на всіх векторах, які відповідають хоч одній з наступних умов:

1.  $v_1$  належить множині  $B_1^1$ ,  $v_2$  містить  $m - i$  нулів та не належить множині  $B_2^1$ , а  $v_3$  містить 1 нуль;
2.  $v_1$  належить множині  $B_1^1$ ,  $v_2$  містить  $m - i + 1$  нулів, а  $v_3$  не містить нульових значень;
3.  $v_2$  належить множині  $B_2^0$ ,  $v_1$  містить  $i$  нулів та не належить множині  $B_1^1$ , а  $v_3$  містить 1 нуль;
4.  $v_2$  належить множині  $B_2^0$ ,  $v_1$  містить  $i + 1$  нулів, а  $v_3$  не містить нульових значень;
5.  $v_1$  належить множині  $B_1^0$ ,  $v_2$  належить множині  $B_2^0$ , а  $v_3$  містить 2 нулі.

Якщо модель  $K(m, n)$  є допоміжною при побудові іншої МВР-моделі, в результаті модифікації множина векторів з  $m$  нулями, на яких значення кон'юнкції виразів її реберних функцій не прийматиме нульового значення, складатиметься з всіх векторів, які відповідають хоч одній з наступних умов:

1.  $v_1$  належить множині  $B_1^1$ ,  $v_2$  містить  $m - i$  нулів, а  $v_3$  не містить нульових значень;

2.  $v_2$  належить множині  $B_2^1$ ,  $v_1$  містить  $i$  нулів, а  $v_3$  не містить нулів; а множина векторів з  $m - 1$  нулями, на яких значення кон'юнкції виразів її реберних функцій прийматиме нульове значення складається з всіх векторів, які відповідають хоч одній з наступних умов:

1.  $v_1$  належить множині  $B_1^0$ ,  $v_2$  містить  $m - i$  нулів та не належить множині  $B_2^1$ , а  $v_3$  не містить нулів;

2.  $v_2$  належить множині  $B_2^0$ ,  $v_1$  містить  $i$  нулів та не належить множині  $B_1^1$ , а  $v_3$  не містить нульових значень;

3.  $v_1$  належить множині  $B_1^0$ ,  $v_2$  належить множині  $B_2^0$ , а  $v_3$  містить один нуль.

Окрім того, в розділі отримано оцінку максимальної кількості векторів, що можуть бути блоковані запропонованим методом. Доведено, що якщо доступною є довільна побудова базової  $K(m, n)$  моделі, то реберна функція, модифікація якої призводить до блокування максимального для даного сімейства (тобто з тими ж параметрами  $m$  і  $n$ ) моделей числа векторів стану системи, буде знаходитися серед функцій, які залежать від всіх вхідних змінних. Також доведено, що для фіксованого значення параметра  $i$ , максимальну кількість векторів стану системи буде блоковано при значеннях параметрів  $n_1 = \left\lfloor \frac{i(n+1)}{m+1} \right\rfloor$ ,  $n_2 = n - n_1$ ,  $n_3 = 0$ . На рис. 3 наведено залежність максимальної кількості векторів, блокованих в результаті модифікації моделі  $K(6, 30)$ , від значення параметру  $n_1$  для різних значень параметру  $i$ .

Хоча запропонований метод і дозволяє досить гнучко виконувати модифікації МВР-моделей, іноді зміни тільки однієї реберної функції є недостатньо для досягнення необхідного результату. Саме тому **третій розділ** роботи присвячено аналізу випадку модифікації одночасно кількох реберних функцій моделі.

Розглядається випадок модифікації моделі, що призводить до її посилення. Показано, що в загальному випадку зміни кількох реберних функцій МВР-моделі  $K(m, n)$  окрім векторів із  $m + 1$  нулями можуть бути блоковані також вектори з більшою кількістю нулів, аж до  $m + M$ , де  $M$  – кількість функцій, що були модифіковані. Це явище в деяких випадках може стати негативним побічним ефектом. Доведено, що цей ефект не з'являється, якщо модифікацію проведено так, що для будь-якого вектора з  $m + t$  нулями, де  $2 \leq t \leq M$ , від значень відповідних функцій базової моделі відрізняється значення менш ніж  $t$  функцій модифікованої моделі.

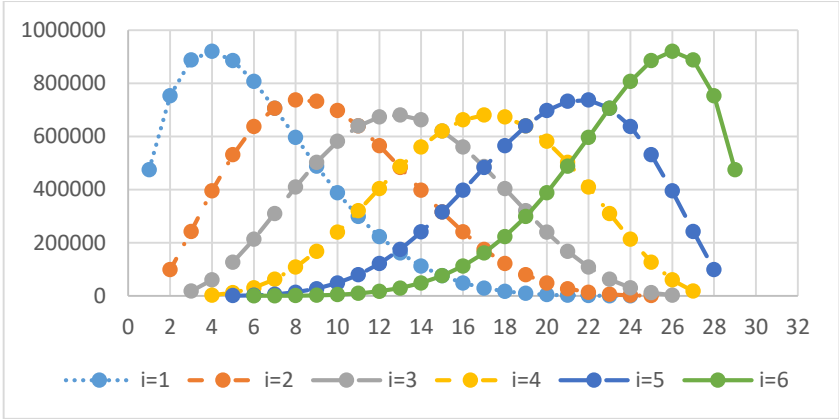


Рис. 3 – Залежність максимальної кількості векторів, блокованих в результаті модифікації моделі  $K(6, 30)$ , від значення параметру  $n_1$  для різних значень  $i$

Оскільки даний критерій є досить складним для практичного застосування, для випадку модифікації двох реберних функцій МВР-моделі знайдені більш прості критерії.

Так, нехай модифіковано дві реберні функції:

$$f_1 = \kappa_{11}(i, n_{11}) \vee \kappa_{12}(m - i, n_{12}), i \in \mathbb{N}, 1 \leq i < m$$

та

$$f_2 = \kappa_{21}(j, n_{21}) \vee \kappa_{22}(m - j, n_{22}), j \in \mathbb{N}, 1 \leq j < m.$$

Множину вхідних змінних можна поділити на три підмножини, що взаємно не перетинаються:  $V_{11}$ ,  $V_{12}$  та  $V_{13}$ , де  $V_{11}$  – множина змінних, від яких залежить вираз  $\kappa_{11}$ ,  $V_{12}$  – множина змінних, від яких залежить вираз  $\kappa_{12}$ , а  $V_{13}$  – множина змінних, від яких не залежить ані  $\kappa_{11}$ , ані  $\kappa_{12}$ . З іншого боку, множину вхідних змінних можна поділити на три інші підмножини, що взаємно не перетинаються:  $V_{21}$ ,  $V_{22}$  та  $V_{23}$ , де  $V_{21}$  – множина змінних, від яких залежить вираз  $\kappa_{21}$ ,  $V_{22}$  – множина змінних, від яких залежить вираз  $\kappa_{22}$ , а  $V_{23}$  – множина змінних, від яких не залежить ані  $\kappa_{21}$ , ані  $\kappa_{22}$ . Потужності множин  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{13}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{22}$  та  $V_{23}$  позначимо відповідно як  $n_{11}$ ,  $n_{12}$ ,  $n_{13}$ ,  $n_{21}$ ,  $n_{22}$  та  $n_{23}$ .

Доведено, що побічний ефект, який полягає в блокуванні векторів із  $m + 2$  нулями не з'являється, у наступних випадках:

1.  $V_{11} = V_{21}$ ,  $V_{12} = V_{22}$ ;
2.  $V_{11} = V_{22}$ ,  $V_{12} = V_{21}$  та  $i + j \leq m$  або  $i + j > m + 2$ ;
3.  $V_{11} \subset V_{21}$  та  $V_{12} \subset V_{21}$ ;
4.  $V_{11} \subset V_{22}$ ,  $V_{12} \subset V_{22}$  та  $j > 2$ ;
5.  $V_{21} \subset V_{11}$  та  $V_{22} \subset V_{11}$ ;
6.  $V_{21} \subset V_{12}$ ,  $V_{22} \subset V_{12}$  та  $i > 2$ ;
7.  $V_{11} \subset V_{23}$ ,  $V_{12} \subset V_{23}$ ,  $V_{21} \subset V_{13}$ ,  $V_{22} \subset V_{13}$  та  $m > 2$ .

При цьому потужність множини блокованих векторів може бути розрахована за формулою:

$$N = N_1 + N_2 = |B_1|(C_{n_{12}}^{m-i} \cdot n_{13} + C_{n_{12}}^{m-i+1}) + |B_2|(C_{n_{22}}^{m-j} \cdot n_{23} + C_{n_{22}}^{m-j+1}).$$

Побічний ефект не виникає також в наступних випадках:

1.  $V_{11} = V_{22}$ ,  $V_{12} = V_{21}$  та  $i + j = m + 1$  та  $n_{13} = n_{23} = 0$ ;
2.  $V_{11} \subset V_{22}$ ,  $V_{12} \subset V_{22}$ ,  $j = 1$ ,  $V_{21} = V_{13}$  та  $m - i = n_{12}$ ;
3.  $V_{21} \subset V_{12}$ ,  $V_{22} \subset V_{12}$ ,  $i = 1$ ,  $V_{11} = V_{23}$  та  $m - j = n_{22}$ .

Потужність множини блокованих векторів при цьому розраховується за формулою:

$$N = |B_1|(C_{n_{12}}^{m-i} \cdot n_{13} + C_{n_{12}}^{m-i+1}) + |B_2|(C_{n_{22}}^{m-j} \cdot n_{23} + C_{n_{22}}^{m-j+1}) - |B_1||B_2|.$$

Запропоновані критерії дозволяють легко вибирати пари функцій, що можуть бути модифіковані. Для випадків же, коли необхідно змінювати більшу кількість функцій, можливо сформулювати аналогічні критерії.

**Четвертий розділ** присвячено питанню самотестування ВБС. Розглядаються системи, в яких кожний процесор, окрім виконання своїх безпосередніх задач, може проводити тестування роботи деякої множини інших процесорів. Визначення стану системи в потоці відмов, тобто, множини роботоздатних процесорів, відбувається на основі значень, отриманих в результаті проведення деякого набору таких тестів.

Вважається, що тестування проводяться згідно з моделлю Препарати-Метса-Чена. Результатом перевірки деякого процесора буде 1, якщо були виявлені помилки, тобто, процесор є несправним, або 0, якщо помилок виявлено не було. Проте, наведена інтерпретація результатів є достовірною тільки в разі, якщо тестуючий процесор працює коректно, в іншому ж випадку може бути отримано значення як 0, так і 1 незалежно від стану процесора, що тестувався.

Оскільки виконання взаємних тестувань вимагає використання частини обчислювальних ресурсів системи, доцільною є мінімізація кількості таких тестів. В той же час, особливості організації системи можуть накладати додаткові обмеження, зокрема, обмежуючи множину пар процесорів, що можуть тестувати одне одного. В розділі запропоновано аналітичний апарат, що дозволяє за результатами проведених тестувань визначити, якщо це можливо, стан системи. Більше того, запропонована формалізація може використовуватися для доведення різного роду тверджень, зокрема, можливості чи неможливості виявлення помилок заданої кратності, розробки алгоритмів вибору оптимального набору тестів, пошуку шляхів модифікації системи з метою підвищення її ступені діагностованості тощо.

Суть методу полягає в формуванні на основі результатів проведених тестів булевого рівняння, булеві невідомі якого відповідають станам процесорів системи: 1 – роботоздатний, 0 – несправний. Вирішення рівняння призводить до визначення стану системи в потоці відмов. Якщо ж рівняння не має однозначного рішення, то це означає що або необхідно провести додаткові тести, або стан системи визначити неможливо.



В загальному випадку рівняння має вигляд:

$$R_1 R_2 \wedge \dots \wedge R_n = 1,$$

де  $n$  – кількість проведених тестів, а  $R_k$  – вираз, що відповідає результату  $k$ -го тесту та має вигляд

$$R_k \triangleq x_j \vee \bar{x}_i,$$

якщо в результаті не було виявлено помилок, або

$$R_k \triangleq \bar{x}_j \vee x_i,$$

якщо в результаті помилки були виявлені, де  $x_i$  та  $x_j$  – невідомі, що відповідають станам тестуючого та тестованого процесорів відповідно. В результаті виконання перетворень ліва частина рівняння може бути представлена у вигляді ДДНФ:

$$C_1 \vee C_2 \vee \dots \vee C_m = 1.$$

Варто зазначити, що при проведенні самотестування очікується, що кількість несправних процесорів не перевищує деякого числа  $t$ , тому в процесі виконання перетворень всі кон'юнкції, що містять більш ніж  $t$  інвертованих змінних мають бути вилучені.

Однозначне вирішення отриманого рівняння можливе лише у випадку, якщо  $m$  дорівнює 1, в цьому разі всі неінвертовані змінні в  $C_1$  відповідатимуть роботоздатним процесорам, а всі інвертовані – несправним. Якщо  $m > 1$ , то необхідне проведення додаткових тестів, а якщо всі можливі тести вже були проведені, то визначити стан системи є неможливим. Ситуація ж, де  $m = 0$  може мати місце лише коли кількість несправних процесорів є насправді більшою ніж  $t$ , проте, в цьому разі можливими є і обидві попередні ситуації, а стан системи, відповідно, визначити неможливо.

Також отримано оцінку ефективності запропонованого методу для заданої множини тестових перевірок, яка може бути представлена за допомогою діагностичного графу. Діагностичним графом системи є орієнтований граф, вершини якого відповідають процесорам системи, а дуги разом з результатами тестування ілюструють можливості проведення відповідного тесту. Показано, що метод дозволяє встановити стан системи при виході з ладу не більш, ніж  $M$  будь-яких її процесорів, тоді і тільки тоді, коли для будь-якої множини  $F$  вершин її діагностичного графу  $G$  потужністю  $K$  існує  $T > M - \left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor$  вершин графу  $G$ , що не містяться в  $F$ , таких, що з них є дуги в деякі з вершин з множини  $F$ .

**В п'ятому розділі** розглянуто інші види моделей, що можуть бути отримані шляхом композиції та розширення МВР-моделей. Запропоновані моделі вимагають додаткового дослідження та можуть стати основою для подальших робіт.

Зокрема, МВР-моделі можуть бути застосовані до так званих зважених систем. В таких системах кожний компонент має свою вагу, що характеризує його відносний вклад в роботоздатність системи (наприклад, вага може визначатися продуктивністю процесора). Вихід з ладу компонентів з більшою вагою, ймовірно, більш суттєво знижує її роботоздатність. Аналогічно до базових, система може залишатися роботоздатною доти, доки сумарна вага всіх її роботоздатних

процесорів є не меншою ніж деяке порогове значення. Зазначимо, що система може бути і небазовою, наприклад, бути стійкою до деяких випадків, коли вага буде нижчою ніж зазначений поріг.

Для побудови моделі зваженої базової системи запропоновано ваги компонентів та порогове значення представити у вигляді цілих чисел. Набір цих значень є інваріантним щодо множення на будь-яке додатне число, тому у випадку, якщо вони представлені раціональними числами, достатньо помножити їх на їхній спільний знаменник. Якщо ж серед даних чисел є ірраціональні, вони можуть бути наближені за допомогою раціональних із довільною точністю. Далі у векторі стану системи необхідно повторити значення, що відповідають кожному з компонентів системи кількість раз, рівну значенню ваги цього компонента. Після цього будується МВР-модель  $K(m, n)$ , де  $m$  – значення порогу, а  $n$  – кількість елементів отриманого вектору, або, з іншого боку, сума ваг всіх компонентів системи. Оскільки деякі з компонентів початкового вектору стану системи повторюються, часто можливим стає спрощення виразів деяких реберних функцій моделі. Якщо ж система є небазовою, то модель може бути відповідним чином модифікована, зокрема, одним із вже відомих методів.

Інше розширення МВР-моделей базується на використанні в якості реберних функцій багатозначної логіки. Такі моделі можуть бути застосовані для систем та їх компонентів, які в потоці відмов мають більше двох станів, тобто, окрім повністю роботоздатного та несправного мають додаткові стани часткової роботоздатності. Зазначимо, що кількість станів у кожного з компонентів та системи в цілому в загальному випадку може бути різною. Відповідно, компоненти вектору стану системи матимуть більше двох можливих значень. Реберні функції моделі визначені на множині всіх можливих значень вектору стану системи та приймають значення з множини, що відповідає можливим станам системи в потоці відмов. Відповідно, в залежності від значення вектору стану системи ребрам графа моделі будуть співставлені деякі цілі числа-ваги, кожне з яких відповідає деякому стану системи в потоці відмов. Для визначеності запропоновано нумерувати стани системи в порядку зростання ступені роботоздатності.

Для визначення стану системи достатньо в графі моделі знайти такий кістяк, у якого вага ребра з мінімальною вагою буде найбільшою. Значення цієї ваги і відповідатиме стану системи в потоці відмов. З цією метою були виконані модифікації алгоритмів Прима та Крускала.

Найпростіша модель розглянутого вище типу може бути побудована на базі МВР-моделі  $K(m, n)$  шляхом заміни у виразах її реберних функцій операцій кон'юнкції на операції вибору мінімуму, а операції диз'юнкції – на операції вибору максимуму. Така модель відповідатиме системі, яка приймає стан  $s$ , коли не менш ніж  $m$  із  $n$  її компонентів мають стан не нижчий, ніж  $s$ .

Композиція моделей може бути застосована зокрема для побудови моделей ієрархічних систем. В таких системах для кожного модуля можуть бути

побудовані свої моделі, які в свою чергу об'єднуються за допомогою моделей вищих рівнів ієрархії. При цьому, кількості рівнів ієрархії в системі та її моделі в загальному випадку можуть відрізнятися. В розділі запропоновано спосіб отримання моделі  $K(0, n)$ , яка не може бути створена звичайним алгоритмом побудови MBP-моделей. Така модель необхідна зокрема для побудови моделей деяких типів ієрархічних систем. Приклад структури GL-моделі ієрархічної системи наведено на рис. 4.

Іншим випадком композиції є побудова моделей систем з ковзним резервом. В таких випадках значення реберних функцій допоміжних моделей формують вектор стану моделі системи.

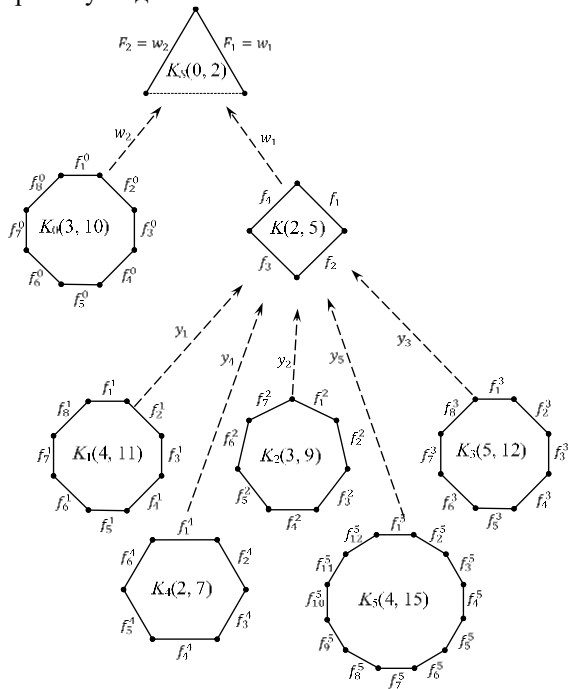


Рис. 4 – Приклад структури моделі ієрархічної системи

Зокрема, запропоновано метод побудови моделі системи, що складається з  $M$  підсистем, при цьому  $i$ -та підсистема включає  $n_i$  процесорів та є стійкою до відмови  $m_i$  з них. Крім того, в системі є ковзний резерв, що містить  $r$  процесорів, які в результаті реконфігурації можуть бути довільним чином розподілені між модулями системи. Для роботи системи необхідна роботоzдатність всіх її підсистем. Приклад структури такої системи наведено на рис. 5.

Для побудови моделі такої системи відповідно до запропонованого методу необхідно побудувати  $M$  допоміжних моделей, кожна з яких відповідає одній з

підсистем. Зокрема, для  $i$ -ї підсистеми необхідно побудувати модель  $K(m_i + 1, n_i)$ , яка на вхід приймає частину вектору стану системи, що відповідає станам процесорів даної підсистеми. Після побудови всіх допоміжних моделей значення їх реберних функцій, а також частина вектору стану системи, що відповідає станам процесорів ковзного резерву об'єднуються, формуючи вхідний вектор кінцевої моделі  $K(r, N)$ , що є моделлю даної системи. Значення  $N$  є довжиною отриманого вхідного вектору моделі і може бути розраховане за формулою:

$$N = r + \sum_{i=1}^M (n_i - m_i + 1).$$

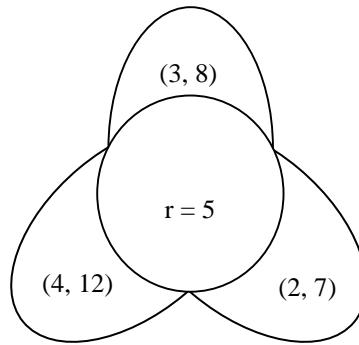


Рис. 5 – Структура системи із ковзним резервом, що містить три підсистеми

Також запропоновано модель системи, в якій деякі підсистеми можуть виступати в якості «донорів», тобто, при необхідності віддавати частину своїх ресурсів, а деякі інші – в якості «реципієнтів», тобто, приймати ці ресурси для забезпечення своєї роботоздатності. Для її побудови в якості допоміжної запропоновано використовувати двоїсту МВР-модель, що відрізняється від звичайної заміною в виразах своїх реберних функцій операцій кон'юнкції операціями диз'юнкції та навпаки.

## ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано методи перетворення базових МВР-моделей шляхом модифікації їх реберних функцій з метою адекватного відображення поведінки небазових відмовостійких багатопроцесорних систем керування складними об'єктами в потоці відмов, а також метод визначення вектору стану таких систем із результатів взаємного тестування пар їх процесорів.

Основні результати роботи полягають в наступному.

1. Проведено аналіз відомих методів розрахунку показників надійності відмовостійких багатопроцесорних систем. Встановлено, що при застосуванні до ВБС керування об'єктами критичного застосування, які відрізняються складною

поведінкою в потоці відмов, найбільш ефективними є методи, що базуються на проведенні статистичних експериментів з моделями.

2. Запропоновано метод модифікації реберних функцій МВР-моделі. Сформульовані вирази, що дозволяють теоретично передбачити множину та кількість векторів, блокованих в результаті модифікації однієї реберної функції моделі в залежності від виразу цієї функції (а точніше значень параметрів, використаних для її створення згідно з алгоритмом побудови МВР-моделей) та виду модифікації. З одного боку метод дозволяє будувати GL-моделі для ВБС, що по різному ведуть себе при появі відмов однієї кратності, а з іншого боку зменшує час виконання одного експерименту з моделлю (на 5-18 відсотків для різних ВБС).

3. Виконано аналіз поведінки моделі при модифікації кількох реберних функцій. Виявлено, що в цьому випадку можуть бути блоковані вектори, кількість нулів в яких перевищує значення відмовостійкості відповідної базової системи але не більш ніж на число функцій, що були модифіковані. З одного боку це визначає мінімальну кількість реберних функцій, які необхідно модифікувати для блокування тих чи інших векторів стану системи, а з іншого вказує на можливість виникнення іноді небажаного побічного ефекту у вигляді блокування векторів із підвищеною кратністю відмов.

4. Сформульовано критерії вибору пар реберних функцій МВР-моделі, модифікація яких не призводить до появи вищезгаданого побічного ефекту тобто, дозволяє блокувати лише вектори з кількістю нулів рівно на один більшою, ніж значення відмовостійкості відповідної базової системи. Даний сценарій модифікації вбачається найбільш імовірним з практичної точки зору. Для випадку одночасної модифікації більш, ніж двох реберних функцій, критерії, хоч і не наведені в роботі (зокрема, через їх значну громіздкість), проте можуть бути отримані аналогічним чином.

5. Розроблено аналітичний апарат для аналізу результатів взаємного тестування пар процесорів ВБС з довільною топологією зв'язків та формального отримання достовірного вектору стану системи (згідно з моделлю Препарата-Метса-Чена), що базується на спрощенні булевого виразу у символічному вигляді та представленні його у доскональній диз'юнктивній нормальній формі (ДДНФ). Даний апарат може також бути використаний для пошуку оптимальних або квазіоптимальних (за кількістю необхідних тестів) стратегій вибору наступних тестів в залежності від результатів попередніх. Виконано оцінку ефективності запропонованого методу відповідно до заданого набору тестових перевірок. Сформульовано критерії для діагностичного графу, що визначають максимальну кратність відмов, при яких застосування методу є можливим.

6. Запропоновано метод формування моделей так званих зважених систем, компоненти яких мають різні ваги, що характеризують їх вклад в процес розрахунку. Метод базується на дублюванні відповідних елементів у векторі стану системи. Відзначено, що можливе ускладнення виразів реберних функцій

компенсується спрощенням за рахунок того, що деякі змінні входять до виразів із повтореннями.

7. Запропоновано узагальнення GL-моделі із використанням функцій багатозначної логіки, що дозволяє будувати моделі систем, які, як і їх компоненти, мають більш ніж два стани роботоздатності. Замість критерію зв'язності в таких моделях запропоновано використовувати критерій наявності в графі кістякового дерева, всі ребра якого мають вагу не меншу ніж задана. З метою зменшення складності пошуку таких дерев виконано модифікацію алгоритмів Прима та Крускала.

8. Запропоновано метод побудови моделей ієрархічних систем, що базується на композиції GL-моделей, при якій значення результатів моделей нижнього рівня ієрархії формують вхідні вектори моделей верхнього рівня. При цьому передбачено можливість формування підсистем верхніх рівнів ієрархії з комбінації підсистем нижніх рівнів та безпосередньо процесорів із реалізацією відмовостійкості. Варто зазначити, що кількості та структура рівнів ієрархії системи та моделі в загальному випадку можуть відрізнятися.

9. Запропоновано метод побудови моделей систем із ковзним резервом, що базується на композиції МВР-моделей, а також модифікована двоїста МВР-модель, яка спрощує побудову таких моделей. При цьому враховується, що підсистеми ВБС можуть бути самі по собі відмовостійкими.

10. Розроблено програмне забезпечення, за допомогою якого отримані експериментальні дані, що підтверджують коректність та ефективність теоретично отриманих результатів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Romankevich A.M. Hierarchical Graph-Logical Models of Multiprocessor Systems Based on Grouping of Their Components / A.M. Romankevich, K.V. Morozov, V.A. Romankevich // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security.– 2019.– Vol. 19, No.10.– P. 138-143. *Автором запропоновано використання проміжних допоміжних моделей для поєднання моделей, що відповідають підсистемам нижнього та поточного рівня ієрархії. (Закордонне видання, реферується наукометричною базою «Web of Science»)*

2. Romankevich A.M. Graph-Logic Models of Hierarchical Fault-Tolerant Multiprocessor Systems / A.M. Romankevich, K.V. Morozov, V.A. Romankevich // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security.– 2019.– Vol. 19, No.7.– P. 151-156. *Автором запропоновано метод побудови GL-моделей розглянутих ієрархічних систем. (Закордонне видання, реферується наукометричною базою «Web of Science»)*

3. Морозов К.В. О характере влияния модификации рёберных функций GL-модели на её поведение в потоке отказов / К.В. Морозов, А.М. Романкевич, В.А. Романкевич // Радиоелектронні і комп'ютерні системи.–№6, 2016.– С.108-112.

*Автором виконано аналіз границь зміни поведінки моделі в залежності від кількості модифікованих реберних функцій. (Реферується наукометричними базами «Україніка наукова», «Index Copernicus»)*

4. Морозов К.В. Про модифікацію графо-логічної моделі / К.В. Морозов, В.О. Романкевич, К.Р. Потапова // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.– Том 3, № 34.– 2015.– С.42-49. *Автором сформульовано критерії вибору пар функцій, що можуть бути сумісно модифіковані без появи побічного ефекту (блокування векторів із підвищеною кратністю відмов).*

5. Романкевич В.А. Об одном методе модификации рёберных функций GL-моделей / В.А. Романкевич, К.В. Морозов, А.П. Фесенюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – №6, 2014. – С.95-99. *Автором запропоновано спосіб модифікації реберної функції GL-моделі, сформульовано та доведено твердження щодо множини векторів, блокованих в результаті такої модифікації. (Реферується наукометричними базами «Україніка наукова», «Index Copernicus»)*

6. Романкевич В.А. Определение достаточного уровня отказоустойчивости для обеспечения заданной вероятности безотказной работы многопроцессорной системы / В.А. Романкевич, А.П. Фесенюк, К.В. Морозов // Journal of Qafqaz university – Mathematics and computer science. – Volume 1, Number 2. – 2013. – pp.118-126. *Автору належить ідея використання підмножин додаткових векторів для уникнення недоліку в запропонованому алгоритму пошуку множини векторів стану системи. (Закордонне видання)*

7. Романкевич А.М. Об одной GL-модели системы со скользящим резервом / А.М. Романкевич, В.А. Романкевич, К.В. Морозов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – №5, 2013.– С.333-336. *Автором розроблено алгоритм побудови моделі системи. (Реферується наукометричними базами «Україніка наукова», «Index Copernicus»)*

8. Романкевич А.М. Об одной задаче реконфигурирования в многопроцессорных системах / А.М. Романкевич, Мораведж Сейед Милад, В.А. Романкевич, К.В. Морозов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – №5, 2012.– С.91-94. *Автором запропоновано метод оцінки кількості можливих розподілів функцій по процесорах. (Реферується наукометричними базами «Україніка наукова», «Index Copernicus»)*

9. Майданюк І.В. Об одном свойстве GL-модели с минимальным количеством теряемых рёбер / И.В. Майданюк, К.В. Морозов, Е.Р. Потапова, А.В. Шурига // Науковий вісник Чернівецького університету. Сер.: Комп'ютерні системи та компоненти.– 2010. – Т.1, вип. 2.– С.31-34. *Автором доведено твердження про кількість функцій, що приймають нульове значення для другого та третього з розглянутих випадків.*

10. Морозов К.В. О модификации графо-логической модели для систем и их компонентов с множественными состояниями / К.В. Морозов, В.А. Романкевич, Т.Г. Сапсай // Системный анализ и информационные

технології: матеріали 19-й Международной научно-практической конференции SAIT 2017. – К.: УНК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сикорського, 2017. – С.94. *Автору належить ідея використання функцій багатозначної логіки в якості реберних функцій GL-моделей, а також спосіб визначення стану системи відповідно до таких моделей.*

11. Морозов К.В. GL-модель ієрархической системы с процессорами на всех уровнях иерархии / К.В. Морозов, Е.Р. Потапова, Н.К. Кичигин // Комп'ютерні системи і проектування технологічних процесів та обладнання: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (17-19 лютого 2016р). – Чернівці: ЧФ НТУ «ХП», 2016.- С.35-37. *Автору належить ідея використання проміжного рівня ієрархії для поєднання моделей, що описують поведінку системи в потоці відмов процесорів та підсистем.*

12. Морозов К.В. О самотестировании многопроцессорных систем / К.В. Морозов, Е.Р. Потапова // Системный анализ и информационные технологии: материалы 18-й Международной научно-практической конференции SAIT 2016. – К.: УНК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2016. – С.396. *Автором запропоновано формальний метод визначення стану процесорів системи за результатами проведених тестових випробувань.*

13. Морозов К.В. О графо-логических моделях взвешенных систем / К.В. Морозов, В.А. Романкевич, В.В. Олейник // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості. Матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. – Івано-Франківськ – 2015. – С. 206-207. *Автором запропоновано метод побудови моделі системи із заданими цілими або дробовими вагами (кожного з її компонентів).*

14. Потапова К.Р. Формування GL-моделей для систем з ієрархічною структурою / К.Р. Потапова, К.В. Морозов, М.І. Трошина // Прикладна математика та комп'ютинг (ПМК-2015). Збірник тез доповідей. – Київ, НТУУ "КПІ". – 2015. – С. 156-160. *Автором запропоновано метод побудови GL-моделей систем з ієрархічною структурою.*

15. Романкевич А.М. Об одном условии модификации рёберных функций GL-модели / А.М. Романкевич, В.А. Романкевич, К.В. Морозов // Системный анализ и информационные технологии: материалы 17-й Международной научно-практической конференции SAIT 2015.- К.: УНК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2015. – С.106. *Автором проаналізовано границі зміни поведінки моделі в залежності від кількості модифікованих реберних функцій.*

16. Романкевич А.М. О модификации реберных функций GL-моделей / А.М. Романкевич, Т.Г. Сапсай, К.В. Морозов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Тези доповідей. – 2013. – №4 (додаток). – С. 36. *Автором запропоновано спосіб модифікації реберних функцій 2p-моделі.*

17. Гроль В.В. Упрощенная 3-отказоустойчивая GL-модель для отказоустойчивых многопроцессорных систем / В.В. Гроль, К.В. Морозов, В.А. Романкевич // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.



Тези доповідей. – 2012. – №5. – С. 90. *Автором запропоновано метод побудови спрощених базових 3-відмовостійких GL-моделей.*

18. Романкевич В.О. Базова  $K(3, n)$  GL-модель, яка будується методом зсуву змінних / В.О. Романкевич, К.В. Морозов // Прикладна математика та комп'ютеринг (ПМК-2012). Збірник тез доповідей. – Київ, НТУУ "КПІ". – 2012. – С.230-235. *Автором запропоновано алгоритм побудови базових GL-моделей, що базується на зсуві змінних.*

19. Романкевич В.А. Построение GL моделей поведения в потоке отказов для систем со скользящим резервом / В.А. Романкевич, Мораведж Милад, К.В. Морозов // Тези доповідей Третьої міжнародної науково-практичної конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації». – Вінниця, ВНТУ. – 2011. – С.36-37. *Автору належить ідея побудови системи із ковзним резервом на основі комбінації кількох базових моделей.*

20. Романкевич В.А. О расчёте надёжности отказоустойчивых многопроцессорных систем, подсистемы которых имеют общие процессоры / В.А. Романкевич, А.П. Фесенюк, К.В. Морозов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Тези доповідей. – 2010. – №4 (додаток). – С. 6. *Автором розроблено методіку оцінки похибки для запропонованого в роботі методу розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ієрархічних ВБС, підсистеми яких можуть мати спільні процесори.*

21. Романкевич В.А. Об оптимизации вычисления реберных функций в GL-моделях / В.А. Романкевич, К.В. Морозов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. – Вінниця, ВНТУ. – 2010. – С.379-380. *Автором запропоновано метод оптимізованого розрахунку виразів реберних функцій для базових GL-моделей.*

22. Потапова К.Р. Комп'ютерна програма «Програма підтримки експериментів з графо-логічними моделями відмово стійких багато процесорних систем» / К.Р. Потапова, М.І. Трошина, К.В. Морозов, Б.А. Корнейчик // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір №59822 від 27.05.2015р. *Автором розроблені алгоритми побудови моделей ВБС відповідно до їх параметрів.*

23. Шурига О.В. Комп'ютерна програма «Програма формування та оцінки складності реберних функцій графо-логічної моделі поведінки відмовостійких багато процесорних систем у потоці відмов методом поділу множини змінних на дві рівні частини і методом нерівного поділу» / О.В. Шурига, В.О. Романкевич, К.В. Морозов // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір №39445 від 02.08.2011р. *Автором розроблені алгоритми формування виразів реберних функцій графо-логічної моделі відповідно до заданих параметрів системи.*

## АНОТАЦІЯ

Морозов К.В. **Методи і засоби побудови моделей поведінки небазових відмовостійких багатопроцесорних систем. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, 2021 р.

Дисертація присвячена проблемі побудови графо-логічних моделей (GL-моделей) небазових відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС) з метою розрахунку їх параметрів надійності шляхом проведення статистичних експериментів із вищезгаданими моделями.

Запропоновано метод перетворення GL-моделей за рахунок модифікації виразу будь-якої реберної функції так званої МВР-моделі. Метод базуються на зміні як однієї, так і обох частин виразу реберної функції та дозволяє модифікувати модель так, що на деяких векторах стану системи вона, на відміну від оригінальної, починає показувати роботоздатний і/або нероботоздатний стан. Проаналізовано межі впливу для загального випадку модифікації як однієї, так і кількох реберних функцій на зміну поведінки моделі.

Вперше запропоновано аналітичний апарат, що дозволяє визначати вектор стану  $t$ -діагностованої ВБС на основі результатів взаємного тестування процесорів, згідно із моделлю Препарати-Метца-Чена (ПМЧ-модель), для довільної топології зв'язків між ними.

Вперше запропоновано метод побудови GL-моделей так званих зважених систем, в яких кожний компонент має деяку вагу, що характеризує його вклад в роботоздатність системи в цілому, а також узагальнення методу побудови GL-моделей, що базується на використанні в якості реберних функцій багатозначної логіки та дозволяє використовувати їх для побудови моделей систем, для яких, як і їх компонентів характерні більше двох станів роботоздатності.

Запропоновано метод побудови GL-моделей ієрархічних систем шляхом композиції декількох МВР-моделей, а також моделей систем, що складаються з кількох підсистем та мають ковзний резерв.

**Ключові слова:** відмовостійкі багатопроцесорні системи, графо-логічні моделі, надійність, модель Препарати-Метца-Чена, зважені  $k$ -з- $n$  системи, ієрархічні системи, ковзний резерв.

## ABSTRACT

**Morozov K.V. Methods and tools for building models of behavior of non-basic fault-tolerant multiprocessor systems. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.13.05 – Computer systems and components. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the problem of building graph-logical models (GL models) of non-basic fault-tolerant multiprocessor systems (FTMS) for calculating their reliability parameters by means of carrying out statistical experiments with the above-mentioned models.

A method for transforming of GL-models by modifying the expression of any edge function of so-called MLE-model is proposed. The method is based on changing either any one or both two fragments of the edge function's expression and allows modifying the model so that on some system state vectors, it starts to show an operable and/or inoperable state in contrast to the original one. The boundaries of influence for general case of modification of both single and several edge functions on change of the behavior of the model is analyzed.

For the first time, an analytical apparatus that allows to determine the state vector of  $t$ -diagnosable FTMS based on the results of mutual testing of processors, according to the Preparata-Metze-Chen model (PMC-model), for arbitrary topology of connections between them has been proposed.

For the first time, a method of building GL-models of so-called weighted systems, in which each component has a certain weight that characterizes its contribution to the performance of the system as a whole as well as a generalization of method of building GL-models, based on the usage of multivalued logic edge functions allowing them to be used as models of systems for which, as well as for their components, more than two states of operability are available are proposed.

A method of building GL-models of hierarchical systems by means of composition of several MLE-models as well as a method of building models of systems consisting of several subsystems and having a sliding reserve are proposed.

**Key words:** fault-tolerant multiprocessor systems, graph-logical models, reliability, Preparata-Metze-Chen model, weighted  $k$ -out-of- $n$  systems, hierarchical systems, sliding reserve.

## АННОТАЦИЯ

**Морозов К.В. Методы и средства построения моделей поведения небазовых отказоустойчивых многопроцессорных систем. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. Национальный

технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, 2021 г.

Диссертация посвящена проблеме построения графо-логических моделей (GL моделей) небазовых отказоустойчивых многопроцессорных систем (ОМС) в целях расчета их параметров надежности путем проведения статистических экспериментов с вышеупомянутыми моделями.

ОМС, состоящая из  $n$  процессоров и остающаяся работоспособной при выходе из строя не более, чем  $m$  любых из них называется базовой. Все остальные системы, не соответствующие данному критерию, называются небазовыми.

Один из эффективных методов расчета параметров надежности ОМС, в том числе небазовых, основан на проведении статистических экспериментов с так называемыми графо-логическими моделями, описывающими поведение системы в потоке отказов.

Графо-логическая модель представляет собой неориентированный граф, ребрам которого соответствуют булевы реберные функции, зависящие от так называемого вектора состояния системы, каждый элемент которого соответствует состоянию одного из процессоров системы и принимает значение 1, если тот является работоспособным и 0 в противном случае. Если реберная функция принимает нулевое значение, соответствующее ей ребро, исключается из графа модели. Связность последнего характеризует состояние системы в потоке отказов: потеря связности графом соответствует потере работоспособности системой.

Известен ряд методов, позволяющих строить различные GL-модели, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. В частности, так называемые МВР-модели (минимум выпадающих ребер) имеют такое свойство: они теряют минимальное число ребер на векторах с кратностью отказов, на единицу превышающей степень отказоустойчивости системы. Кроме того, они базируются на циклических графах, процесс определения связности которых является тривиальным. Однако, алгоритм построения этой разновидности моделей (как и некоторых других) применим только для базовых ОМС.

Построение GL-модели для небазовой системы может происходить путем модификации некоторой базовой модели, достаточно близкой к искомой, в результате чего на некотором множестве так называемых блокируемых векторов поведение моделей начинает отличаться. Такая модификация может происходить путем изменения структуры графа модели (проведение дополнительных ребер), изменения выражений реберных функций, или путем сочетания этих подходов. В работе рассматривается второй подход, основанный на модификации только выражений реберных функций, в результате чего граф модели остается циклическим.

В результате анализа алгоритма построения реберных функций МВР-модели замечено, что их выражения состоят из двух частей. Предложен метод преобразования GL-моделей за счет модификации выражения любой реберной функции МВР-модели. Метод основан на изменении как одной, так и

обеих частей выражения реберной функции и позволяет модифицировать модель так, что на некоторых векторах состояния системы она, в отличие от оригинальной, начинает показывать работоспособное и/или неработоспособное состояние. Проанализированы свойства модифицированных моделей, сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие определять количество и множество блокируемых векторов в соответствии с параметрами модификации и вида модифицируемой функции. Также выполнен анализ влияния модификации на поведение MBR-модели для случая, когда модифицированная модель используется в качестве вспомогательной при ее построении.

Получена оценка максимального количества векторов, которые могут быть заблокированы предложенным методом. Определены функции и параметры их модификации, которые позволяют достичь этого количества блокируемых векторов.

Проанализированы границы влияния для общего случая модификации как одной, так и нескольких реберных функций на изменение поведения модели. Впервые выполнен анализ необходимости модификации нескольких функций MBR-модели. Обнаружено, что в случае одновременной модификации нескольких реберных функций может проявляться побочный эффект в виде блокировки векторов с повышенной кратностью отказов. Получены критерии, позволяющие избежать его в общем случае, а также критерии выбора пар функций для случая модификации двух реберных функций.

Впервые предложен аналитический аппарат, позволяющий определять вектор состояния  $t$ -диагностируемой ОМС на основе результатов взаимного тестирования процессоров, согласно модели Препараты-Метце-Чена (ПМЧ-модель), для произвольной топологии связей между ними. Метод основан на формировании и преобразовании булевого уравнения специального вида. Сформулированы рекомендации относительно возможных стратегий выбора пар процессоров для проведения дальнейших тестов. Получена оценка эффективности предложенного метода для заданного множества тестовых проверок, которое может быть представлено с помощью диагностического графа.

Впервые предложен метод построения моделей так называемых взвешенных систем, в которых каждый компонент имеет некоторый вес, характеризующий его вклад в работоспособность системы в целом. В частности, взвешенная базовая система (или взвешенная  $k$ -из- $n$  система) остается работоспособной до тех пор, пока суммарный вес всех ее работоспособных компонентов остается не меньшим некоторого порогового значения. Предложенный метод построения GL-моделей таких систем на базе MBR моделей основан на  $n_i$ -кратном дублировании соответствующих элементов вектора состояния системы, выбирая значения  $n_i$  пропорциональными весам соответствующих компонентов системы. Метод может быть применен для случаев весов, представленных как целыми, так и рациональными числами.

Впервые предложено обобщение метода построения GL-моделей, основанное на использовании в качестве реберных функций многозначной логики. Это позволяет использовать их для построения моделей систем, для которых, как и их компонентов характерны более двух состояний работоспособности. То есть, в случаях, когда кроме полностью работоспособного и неисправного имеют место дополнительные состояния частичной работоспособности. Причем количества таких состояний как у системы, так и у каждого из ее компонентов могут различаться между собой.

Предложен метод построения GL-моделей иерархических систем путем композиции нескольких МВР-моделей, а также метод построения моделей систем, состоящих из нескольких подсистем, и имеющих скользящий резерв, основанный на построении вспомогательных моделей для каждой из подсистем с последующим сочетанием значений их реберных функции во входном векторе результирующей модели.

Разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять эксперименты с модифицированными GL-моделями, а также определять вектор состояния системы согласно результатам тестовых проверок, согласно предложенному в работе методу. Получены экспериментальные данные, подтверждающие достоверность теоретически полученных результатов.

**Ключевые слова:** отказоустойчивые многопроцессорные системы, графологические модели, надежность, модель Препараты-Метце-Чена, взвешенные  $k$ -из- $n$  системы, иерархические системы, скользящий резерв.